

スピントロニクスを用いたエネルギー変換技術へ～ Spin-current nano-integration systems: efficient energy conversion based on spintronics

研究代表者 齊藤 英治 Eiji Saitoh, Prof.
 東北大学 金属材料研究所 教授 Tohoku University
 齊藤研究室 <http://saitoh.imr.tohoku.ac.jp/>



要約 Abstract

電子は電荷とスピン(自転)を有する粒子です。これらは別々に利用されてきましたが、ナノテクノロジーの出現により電荷とスピンを物質中で有機的に相互作用させることが可能になりました。ここで鍵となるのは、電流のスピン版である「スピン流」を有効に利用することです。物質中の様々な角運動量はナノスケールでスピン流と相互変換します。本研究ではスピン流の相互作用を有効に引き出すナノシステムを作製し、力学的運動からスピン流・電流を生成させる現象、スピンを利用して熱を効率的に移動させる現象、熱から効率良くスピン流や電流を取り出す現象などを発見しました。

An electron is a particle which carries electric charge and spin. Although charge and spin have been used independently, the recent development of nanotechnology has let charge and spin couple strongly to give rise to new material functions. Here, finding a method to exploit a spin current, a flow of spin angular momentum, is being strongly required; various types of spin angular momentum interact via spin currents in nanoscale. In this study, we found, by creating spin-current nano integration systems, various phenomena including conversion of mechanical motions into spin and electric currents and manipulation of heat using spin currents.

はじめに

スピン流とは電子角運動量の流れです。電荷の流れである通常の電流では、Fig 1(a) に示すようにスピンの向きがランダムであると仮定しており、その場合には、伝導電子の集団の速度分布がゼロであれば電流が流れません。そのような状況でも、ある方向に進む電子とそれと逆方向に進む電子が、互いに逆向きのスピンを持ち易いという傾向が少しでもあれば、スピンの流れは打ち消されずに残ります。その端的な状況を Fig 1(b) に示します。この図においてスピンの収支を考えれば、左から右へ上向きスピンの流れがあることとなります。このように、電流ゼロのままスピンの流れだけを作ることができ、これを伝導電子の運ぶスピン流と呼びます。スピンの向きはすぐさまランダム化するため、スピン流は、ナノスケールで発現する現象です。

この他にも、いくつかのタイプのスピン流が知られていますが、本研究では、スピン流を用いて力学的運動や熱と

スピンを結びつける物理を探求し、それに基づいて新奇な現象を多数発見したので、応用例とともに紹介します。

スピン流による熱コンベヤー

まず、スピン流を用いた熱の制御を試みました。試料には酸化物絶縁体、イットリウム鉄ガーネット ($Y_3Fe_5O_{12}$, YIG) を用い、YIG 中で励起されたスピン流 (正確にはスピン波型スピン流と言われている) による熱移動を赤外線カメラにより観測しました (Fig 2)。YIG 上でマイクロ波を用いて局所的にスピン波を励起してスピン流を伝搬させます。この際に、印加した静磁場に垂直でしかも、一方向にしか伝播しない非相反なスピン流を試料表面に局在するように励起します。この実験により、スピン流は試料端まで伝搬しながら熱を放出することを見出し、スピン流による熱の移動方向の制御に成功しました (スピン流熱コンベヤー効果)。この際、温度勾配は試料端からマイクロ波源へ向けて逆向きに温度勾配が生成されます [1]。

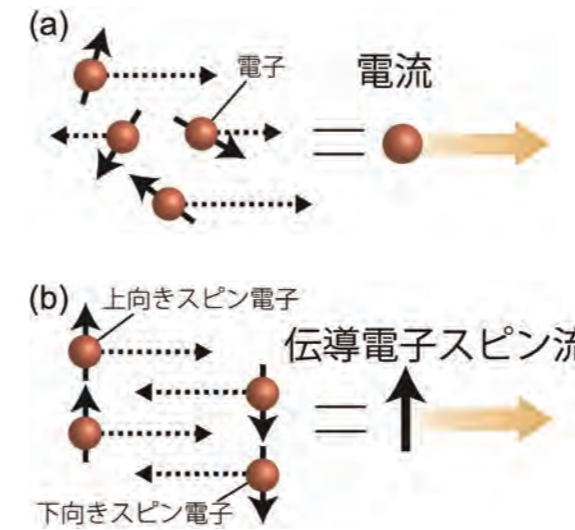


Fig 1. 伝導電子の運ぶ電流(a)とスピン流(b)。
Conduction-electron charge and spin currents.

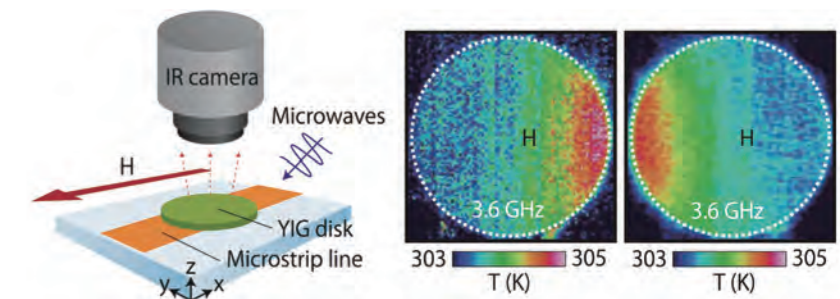


Fig 2. スピン流熱コンベヤー効果。 Spin-current heat conveyor effect.

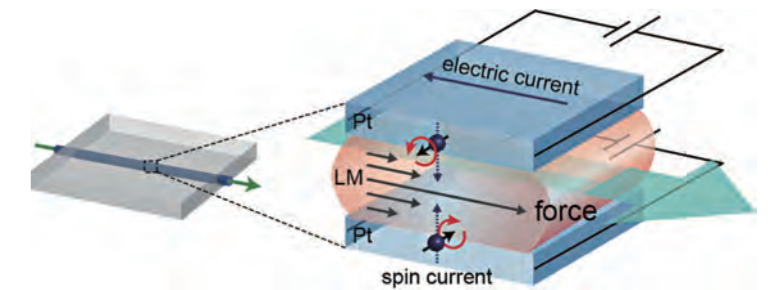


Fig 3. スピン流と力学的運動を相互変換するデバイス構造の模式図。
Mutual conversion between spin currents and mechanical motion.

スピン流による力学運動-電気変換

現在、電気浸透流ポンプや静電/圧電/電磁モータなど、古典的電磁気力によって駆動される動力機構のみが知られています。これに対し、スピントロニクスとマイクロ機械流体工学とを融合させることにより、より単純で小型化可能な発電や動力の利用が可能となります (Fig 3)。

すなわち、電子スピンから直接角運動量を取り出すことができれば、単純な構造を用いてスピン流や電力を生成させることができ、また逆過程を用いれば、同じ構造でほとんど全ての運動 (並進・回転等) を生成することもできるようになります。

力学的運動とスピン流の相互作用という物理像を開拓するために、一般座標共変なディラック方程式からスピンと原子核系の運動を記述する有効モデルを導出しました。このモデルを用いて実験系を設計し、力学的運動からスピン流・電圧生成及びスピン注入による力学的運動の駆動を目指しました。

速度場の勾配である渦度を容易に生成できる表面弾性波あるいは流体を利用することより、このモデルが予言する最も強い相互作用を最大限に引き出すことができます。流体についての有効運動方程式を導き、線形化したナビエーストークス方程式とスピン流の方程式系を組み合わせることによって、液体金属の運動とスピン流の相互作用を記述する基礎方程式を構築しました。それを解析することに

よって、液体金属の力学的運動から観測可能な逆スピンホール電圧を生成できることを導き出しました。この理論をもとに実験系を設計し、力学的運動とスピン流の相互作用に基づく電圧生成現象をはじめで見出しました。この電圧振幅は流速を上昇させると大きくなり、その符号は入射方向を変えることで反転します。温度依存性、速度依存性の測定からこの信号は温度勾配によるゼーベック電圧や圧力勾配に起因するものではないことが示され、液体金属の流体運動の角運動量によるスピン流生成の計算結果と良く整合しました。

今後の展開

本研究では、スピントロニクスとマイクロ機械流体工学の融合についての研究を進め、電子から量子力学原理により発電する技術及び動力を取り出す技術の基礎を開拓しました。スピン流がもたらす熱制御効果は熱の移動制御、冷却等の様々な用途に広く応用できると考えられます [2,3]。今後は、具体的な流路や熱輸送系を作製してこの効果を利用する実験を進めます。

参考文献

- [1] T. An, et.al. Nature materials 12 (2013) 549-553.
- [2] K. Uchida, et.al. Nature materials 10 (2011) 737-741.
- [3] A. Kirihaara, et.al. Nature materials 11 (2012) 686-689.